

# 동력절환용 클러치의 기계식 잠금장치 체결 알고리즘에 대한 연구

## Study of Locking Algorithms for a On/Off Multi-plate Clutch

김수철<sup>1\*</sup> · 김재승<sup>1</sup> · 문상곤<sup>1</sup> · 이근호<sup>1</sup>

Su Chul Kim, Jae Seung Kim, Sanggon Moon and Geun Ho Lee

Received: 4 Sep. 2023, Accepted: 12 Oct. 2023

**Key Words** : Clutch(클러치), Mechanical Lock-up(기계식 잠금장치), Engagement(체결), Control algorithm(제어 알고리즘)

**Abstract**: The locking performance of a multi-plate clutch with a mechanical lock-up system is governed by the engagement algorithm. In this paper, a control algorithm to improve the locking performance of the clutch was studied. A 1D dynamic model was constructed and simulated according to the developed algorithm. The developed algorithm was composed of a method in which the locking device is engaged while generating artificial slip on the friction plate by controlling the piston pressure of the clutch. Furthermore, a case study of the parameters within the developed algorithm was conducted to explore combinations that maximize locking performance and analyze trends according to these parameters.

### 기호 설명

$\omega_{in}$  : input speed, rpm

$\omega_{out}$  : output speed, rpm

$\Delta \omega_1$  : 1<sup>st</sup> speed difference, rpm

$\Delta \omega_2$  : 2<sup>nd</sup> speed difference, rpm

$P_C$  : clutch piston pressure, bar

$P_L$  : lock-up piston pressure, bar

$a_1, a_2$  : linear slope parameter

$t$  : time, sec

### 1. 서 론

동력전달장치에서 클러치는 마찰 디스크 등의 속도 동기화 장치로 구성되어 동력을 연결하거나 끊을

수 있다. 기계식 잠금장치(Mechanical lock-up)가 포함된 클러치는 내부 동기화 장치를 이용하여 입출력 축의 속도를 동기화한 후, 보다 큰 동력을 전달하기 위해 스플라인과 같은 기계식 물림 장치로 입출력 축을 물리적으로 체결할 수 있도록 고안된 장치이다. 이러한 구조의 클러치는 큰 충격 부하에도 슬립이 발생하지 않아 시스템의 안정성을 확보할 수 있고, 동기화 장치의 크기를 줄일 수 있어 큰 전달토크가 필요한 동력전달장치에서 유용하게 사용될 수 있다.

기계식 잠금장치가 포함된 클러치의 체결 성능은 동기화 장치와 기계식 잠금장치의 체결부 및 제어 알고리즘에 따라 결정된다. 클러치의 동기화 장치와 기계식 잠금장치는 주로 유압식 액추에이터 또는 기구 장치로 작동되며, 제어 엔지니어는 이들의 적절한 제어를 통해 빠르게 체결하면서도 시스템의 충격을 최소화해야 한다. 클러치의 작동 장치는 주로 유압식 피스톤이 사용되며, 이 경우 피스톤의 작동을 위한 압력 프로파일은 시스템의 변속 시간 및 충격을 결정하는 주요 설계인자가 된다.

변속기에서 클러치의 동기화 장치는 대부분 여러 개의 마찰 디스크로 구성된다. 이러한 마찰식 동기화 장치의 제어에 관해서는 많은 연구가 이루어졌다. 특히 변속장치와 클러치 피스톤 제어 밸브의 모델링과

\* Corresponding author: sckim@kimm.re.kr

1 Department of Smart Industrial Machine Technologies, Mechanical Systems Safety Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Korea  
Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이들의 제어 특성에 관한 연구가 많이 수행되었으며<sup>1-2)</sup>, 변속 품질 향상을 위한 자동보정 알고리즘과 같이 클러치 제어 알고리즘의 개선을 위한 연구도 다수 수행되었다.<sup>3-5)</sup>

클러치의 기계식 잠금장치는 입출력 축의 동기화가 충분히 이루어진 상태에서 체결되어야 충격을 최소화할 수 있다. 또한 제어 알고리즘에 체결부의 압수 정렬을 맞추기 위한 알고리즘이 포함되어야 잠금장치가 적절한 힘으로 체결된다.

기계식 잠금장치를 포함한 클러치는 지상 차량용 변속장치에는 많이 사용되지 않는다. 그래서인지 잠금장치 체결에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 클러치에 잠금장치가 적용된 사례로 수직이착륙이 가능한 전투기인 F-35B의 클러치 시스템이 있으나<sup>6)</sup>, 기계식 잠금장치 체결 방법 및 성능에 대한 연구 내용은 공개되지 않았다.

본 연구는 기계식 잠금장치가 포함된 클러치에서 잠금장치의 체결 신뢰성을 높이고 체결시간 및 체결충격을 최소화할 수 있는 알고리즘을 구성하고 이에 대한 성능을 극대화하기 위해 수행되었다.

## 2. 클러치 시스템

연구 대상 클러치는 모터의 동력을 추진용 프로펠러로 전달할 때, 그 사이에서 프로펠러의 작동 여부를 제어하기 위한 장치이다. 클러치는 Fig. 1과 같이 입출력 축과 습식마찰판, 기계식 잠금장치 및 이들을 구동하기 위한 유압식 피스톤으로 구성되었다. 입력 축으로 들어온 동력은 마찰디스크 및 기계식 잠금장치의 체결을 통해 출력축으로 전달되며, 잠금장치와 마찰디스크는 유압식 피스톤에 의해 작동된다. 기계식 잠금장치는 도그 클러치가 체결되는 방식으로 구현되며, 좁은 공간에 높은 전달토크 용량을 확보하기 위해 2개의 스플라인이 동시에 물리도록 Fig. 2와 같이 구성된다. 또한 도그 클러치의 입/출력 스플라인이 접촉되는 부분은 체결이 원활하도록 모따기 형상이 구현되어 있다.

프로펠러는 회전 속도가 상승함에 따라 추력이 상승한다. 따라서 클러치가 받는 부하는 출력축의 속도가 증가할수록 상승해야 한다. 본 연구에서 사용된 클러치는 입력축이 3300 rpm으로 상시 구동되며, 출력축 부하는 회전속도에 따라 선형적으로 상승하여 3300 rpm에서는 260 Nm에 도달하는 조건으로 설계되었다.

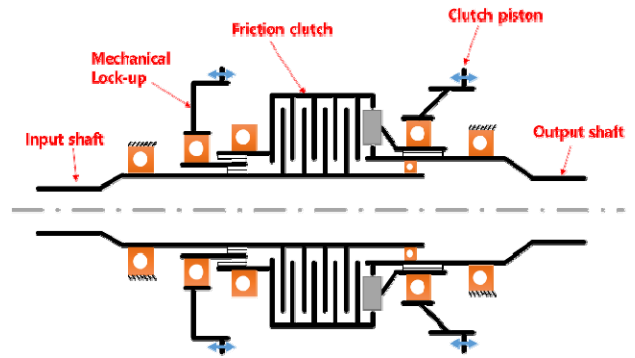


Fig. 2 Friction clutch with mechanical lock-up



<Disengaged lock-up spline>



<Engaged lock-up spline>

Fig. 1 Lock-up spline shape depending on engagement

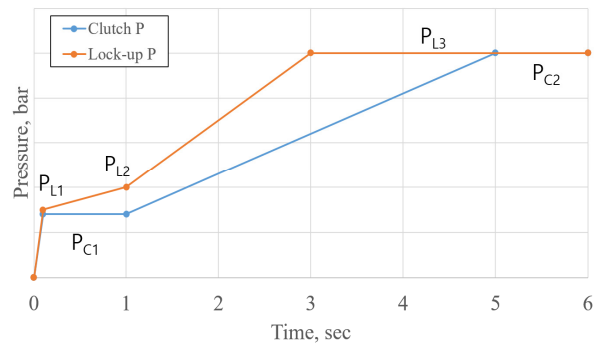


Fig. 2 Control profiles for clutch piston pressure

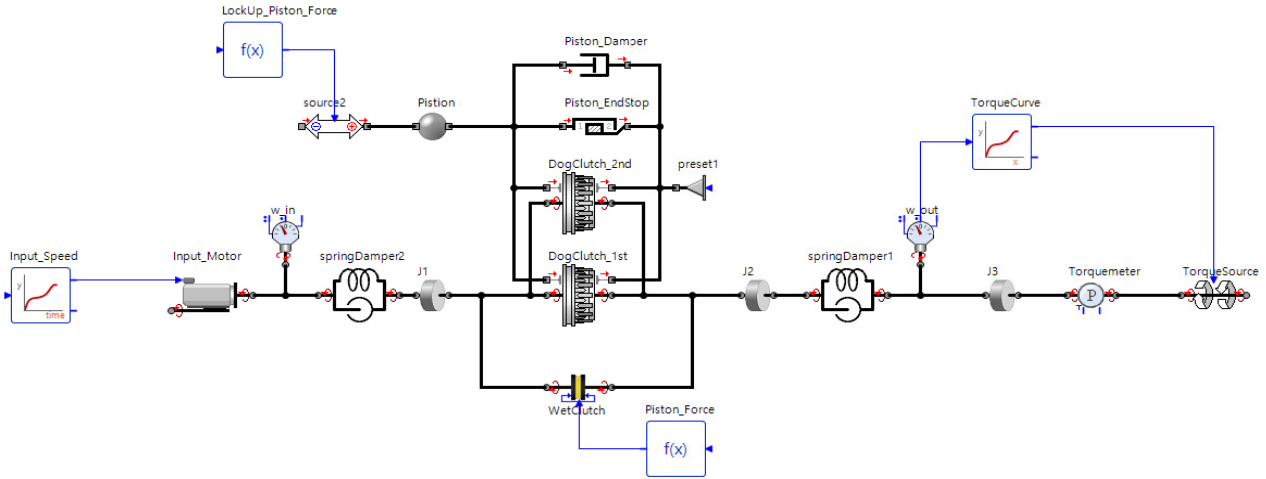


Fig. 3 1D dynamic model for friction clutch with mechanical lock-up

클러치 및 작동시스템은 ESI 社의 1D dynamics 해석 소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 Fig. 3과 같이 모델링하였다. 출력축 부하는 출력축의 회전속도를 피드백 받아 최대 260 Nm까지 상승도록 구성되었다. 2개의 도그클러치는 동일한 힘이 가해지며, 클러치 작동 시 습식마찰판을 압착하는 피스톤 힘과 도그 클러치의 스플라인을 미는 피스톤 힘은 기본적으로 정해진 프로파일에 따라 인가되고, 작동 상황 및 제어 알고리즘에 따라 변형된다. 각 피스톤 힘의 기본 프로파일은 Fig. 4와 같다.

### 3. 클러치 체결 알고리즘의 구성

클러치의 체결을 위한 제어 알고리즘은 아래와 같은 요구사항을 만족시켜야 한다.

- 1) 잠금장치 체결 시 도그클러치의 암수 스플라인 정렬이 어긋나 있더라도 적절한 제어를 통해 항상 체결되어야 한다.
- 2) 잠금장치의 체결시간은 최소화되어야 한다.
- 3) 잠금장치의 체결충격은 최소화되어야 한다.
- 4) 클러치는 잠금장치를 체결하는 시점에도 동력이 끊어지지 않고 연결된 상태를 유지해야 한다.

이를 위한 알고리즘으로 Fig. 5와 같이 클러치 제어 알고리즘을 구성하였다. 체결 알고리즘은 체결 신뢰성 향상을 위해 체결이 실패하더라도 반복적으로 시도하도록 구성되었다. 또한 잠금장치의 원활한 체

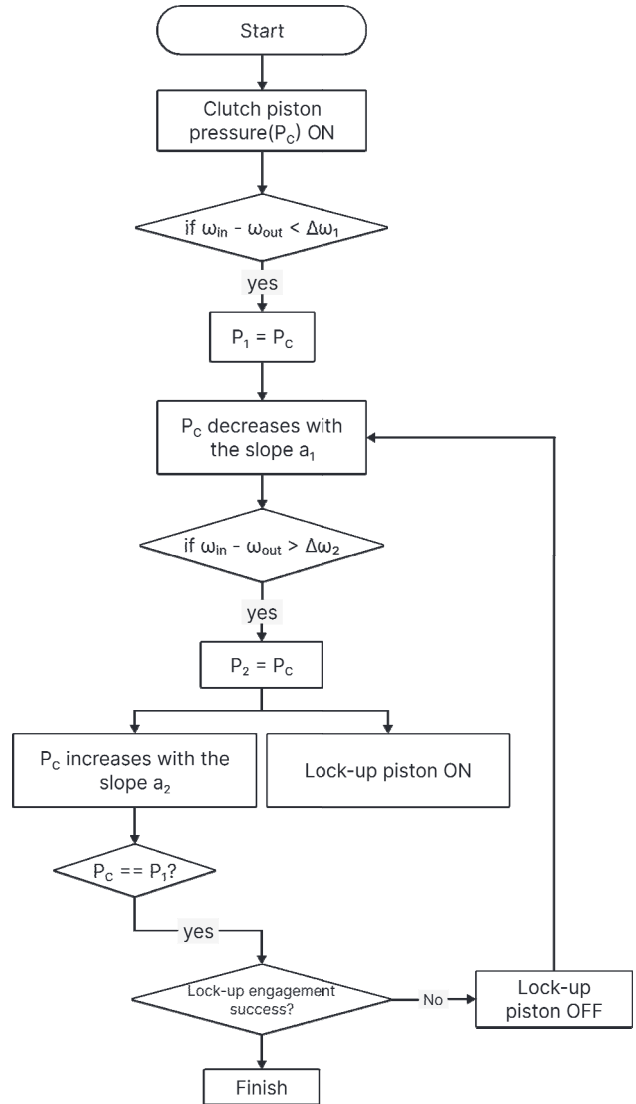


Fig. 4 Flow chart for clutch engagement

결을 위해 마찰판에 인위적인 슬립(slip)을 발생시켜

도그 클러치의 체결력을 최소화하도록 구성하였다.

클러치 체결이 시작되면 설정된 기본 프로파일에 따라 마찰판 압착 피스톤의 압력( $P_C$ )이 상승한다. 입/출력 축이 동기화되면서 속도 차가 설정된  $\Delta \omega_1$  보다 작아지게 되면  $P_C$ 는 상승을 멈추며 이때의 압력을  $P_1$ 으로 정의한다.  $P_C$ 는  $P_1$ 에 도달 후 입출력 속도 차가  $\Delta \omega_2$  보다 커질 때까지  $a_1$ 의 기울기로 하강한다. 이때  $P_C$ 를 계산하는 수식은 식 (1)과 같다.

$$P_C = P_1(1 - a_1)t_1 \quad (1)$$

여기서  $t_1$ 은  $P_C$ 가  $P_1$ 에 직전에 도달했을 때를 0으로 한 기준 시간이다.

압력이 하강함에 따라 마찰판 슬립이 발생하여 입출력 속도 차가  $\Delta \omega_2$  가 되는 순간 잠금장치의 체결을 시작하며 이때의 압력을  $P_2$ 로 정의한다.  $P_C$ 는  $P_2$ 에 도달하는 순간부터  $a_2$ 의 기울기로  $P_1$  까지 다시 상승을 시작한다. 이때  $P_C$ 를 계산하는 수식은 식 (2)와 같다.

$$P_C = P_2(1 + a_2)t_2 \quad (2)$$

여기서  $t_2$ 는  $P_C$ 가  $P_2$ 에 직전에 도달했을 때를 0으로 한 기준 시간이다.

잠금장치의 체결이 완료되면 체결 프로세스가 종료되며, 체결이 실패하면 앞의 프로세스를 반복한다.

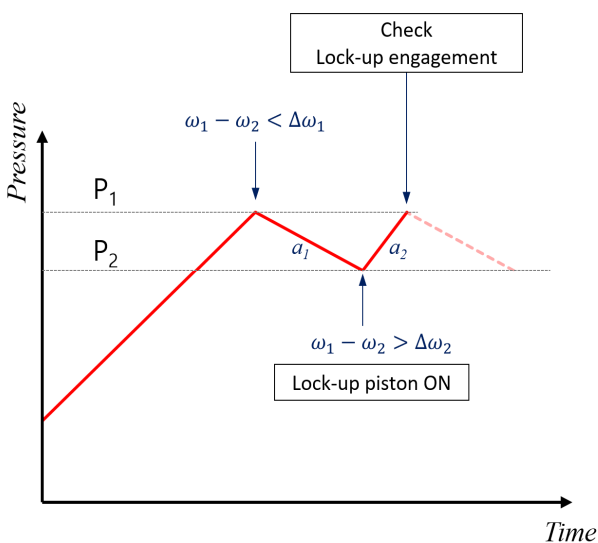


Fig. 5 Example of clutch piston control for lock-up engagement

#### 4. 클러치 체결알고리즘의 성능 최적화

제시된 클러치 제어 알고리즘은 엔지니어가 결정해야 하는 다양한 매개변수를 포함하고 있다. 이러한 인자 중 상수로 처리하거나 체결 성능을 극대화하기 위해 설계 변수로 활용한 매개변수는 Table 1과 같다. 변수로 활용되는 5가지 매개변수는 사례 연구(case study)를 위해 총 3125가지 경우의 수를 갖도록 조합을 구성하였다.

각 조합에서의 시뮬레이션 평가를 위한 척도는 체결시간, 체결충격 및 체결 성공여부로 선정하였다. 체결시간은 습식마찰판의 동기화 후 잠금장치의 작동 피스톤이 초기 위치에서 이동하여 목표 위치까지 도달했을 때까지의 시간이며, 체결 충격은 잠금장치 피스톤이 작동한 이후 프로펠러 관성인  $J_3$ 에서 측정된 가속 토크의 최댓값을 기준으로 하였다. 체결 성공여부는 습식마찰판의 동기화 후 2회 시도 내 체결되면 성공, 아닌 경우 실패로 간주하였다.

Fig. 7은 체결 시뮬레이션 결과 예시를 보여준다. 해당 시뮬레이션은 매개변수  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\Delta \omega_1$ ,  $\Delta \omega_2$ ,  $P_{L2}$ 를 각각 0.04, 0.04, 5, 5, 1.8로 설정하고 수행한 결과이다. 이때 체결시간은 1.643 sec, 체결충격은 97.8 Nm이었다.

Table 3 Parameters for clutch control algorithm

Constants	value
Clutch pressure, $P_{C1}$	1.4 [bar]
Clutch pressure, $P_{C2}$	5.0 [bar]
Lock-up pressure, $P_{L1}$	1.4 [bar]
Lock-up pressure, $P_{L3}$	5.0 [bar]
Variables	value
Lock-up pressure, $P_{L2}$	1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 2.0 [bar]
Speed difference, $\Delta \omega_1$	3, 5, 10, 15, 20 [rpm]
Speed difference, $\Delta \omega_2$	3, 5, 10, 15, 20 [rpm]
Decrease slope, $a_1$	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05
Increase slope, $a_2$	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05

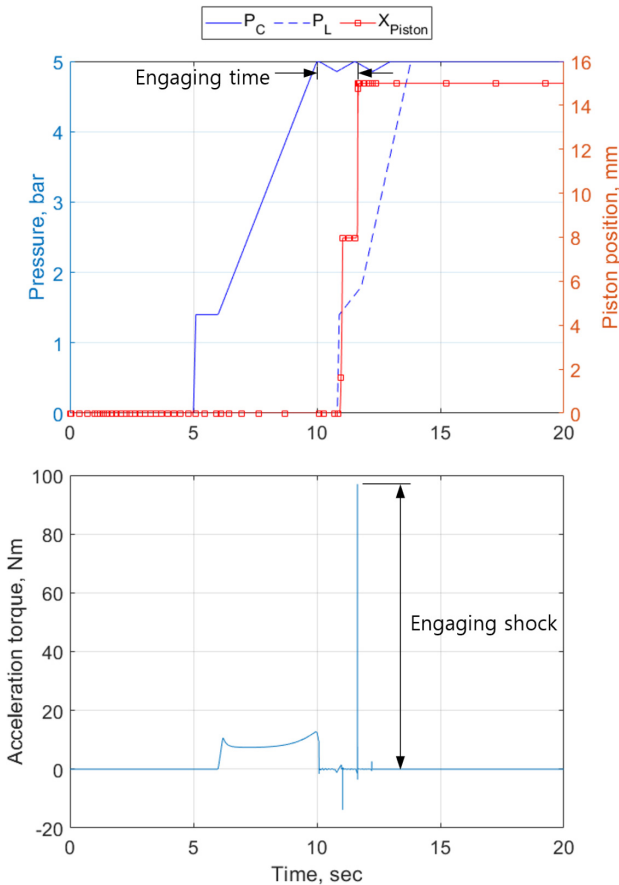


Fig. 6 Simulation results  
( $a_1$ : 0.04,  $a_2$ : 0.04,  $\omega_{in}$ : 5,  $\omega_{out}$ : 5,  $P_{L2}$ : 1.8)

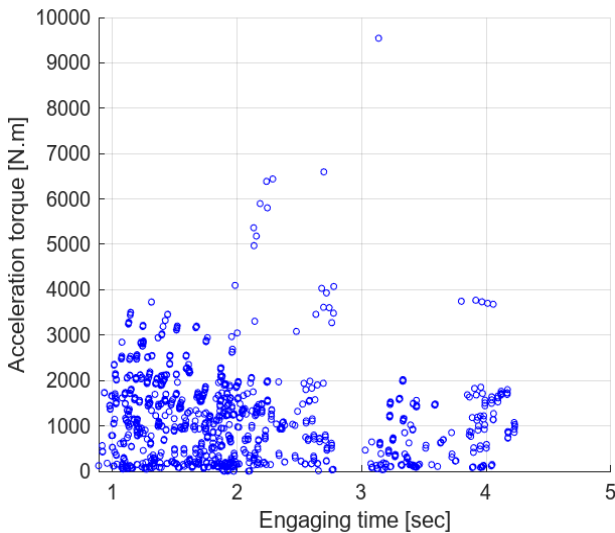


Fig. 7 Simulation results for all combinations

모든 조합에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과, 잠금 장치의 체결이 실패하지 않고 성공한 조합의 수는 1180개였다. 성공한 전체 조합의 체결시간과 체결충격을 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다.

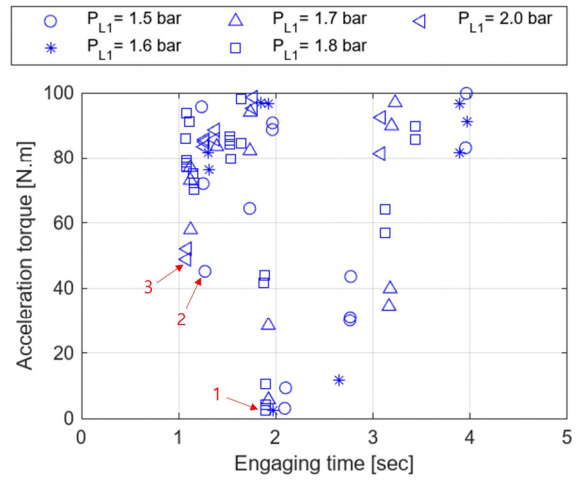


Fig. 8 Simulation results for all combinations (scale down)

Fig. 8의 x, y 축을 조정하여 최소 체결시간과 충격이 잘 보이도록 확대하고, 최적의 결과로 판단되는 3개의 사양을 표기하면 Fig. 9와 같다. 선정된 3개의 해와 그에 따른 체결 성능은 Table 2와 같다. 선정된 최적 해의 가속토크는 예시로 수행한 결과에 비해 최대 97% 감소시킬 수 있으며, 체결시간은 최대 34% 감소시킬 수 있다.

Fig. 10은 시뮬레이션 결과를 매개변수에 따라 상자그래프(boxplot)로 나타낸 것이다. 성능지표 중 가속토크의 경우  $\Delta\omega_1$ 이 커질수록 감소하고,  $\Delta\omega_2$ 와  $P_{L2}$ 가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 그러나 경향성이 뚜렷하지는 않았으며, 다른 매개변수에 대해서도 전반적으로 경향성을 판별하기 어려웠다. 따라서 가속토크는 특정 매개변수가 아닌 전체 매개변수의 조합에 따라 달라지는 특성으로 판단되며, 이를 최소화하기 위해서는 다양한 매개변수 조합에 따른 시스템 응답을 검토해야 한다. 체결시간의 경우  $a_1$ 과  $P_{L2}$ 가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 나머지 매개변수에 대해서는 큰 경향성을 보이지 않았다. 따라서 체결시간을 단축시키기 위해서는  $a_1$ 과  $P_{L2}$ 를 증가시키는 방향으로 알고리즘이 설계되어야 할 것으로 판단된다.

Table 4 Optimal solutions for lock-up engagement

No.	$a_1$	$a_2$	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$P_{L2}$	Shock	Time
	[-]	[-]	[rpm]	[rpm]	[bar]	[N.m]	[sec]
1	0.02	0.05	3	20	1.8	2.53	1.89
2	0.05	0.02	10	10	1.5	45.18	1.27
3	0.04	0.04	3	5	2	48.84	1.08

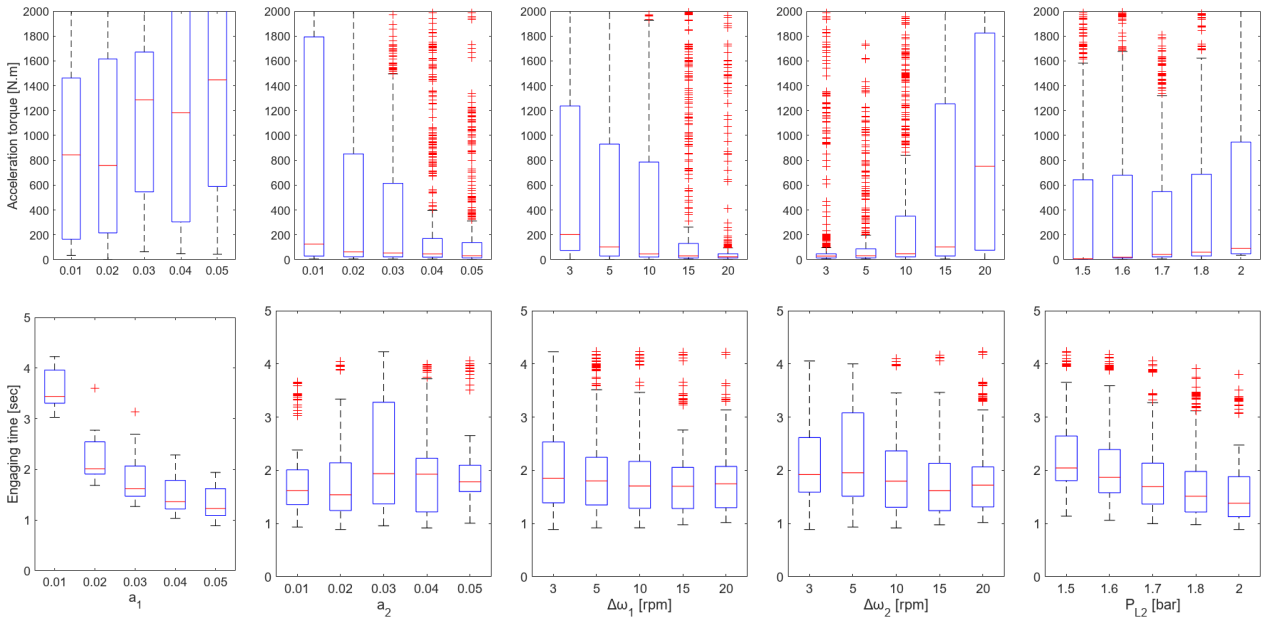


Fig. 9 Boxplots for all simulation results according to parameters

## 5. 결 론

## 후 기

본 논문에서는 기계식 잠금장치가 포함된 클러치의 체결시간 및 체결충격을 최소화하기 위한 알고리즘을 구성하고 성능을 극대화하기 위한 사례연구를 수행하였다. 알고리즘의 매개변수 설정에 따라 체결 성능이 변화하는 것을 확인하였으며, 이들의 적절한 조합을 통해 성능을 극대화할 수 있음을 보였다. 논문의 주요 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 기계식 잠금장치가 포함된 동력전달용 클러치의 체결 알고리즘 검토를 위해 1D 동적 모델을 구성하였다.
- 2) 클러치의 잠금장치의 체결 알고리즘은 마찰판을 이용한 동기화 후 입/출력 축의 회전속도를 이용하여 마찰판의 압착 피스톤 압력을 제어함으로써 인위적인 슬립을 발생시킴과 동시에 잠금장치를 체결하도록 방식으로 구성되었다.
- 3) 체결 알고리즘은 시스템에 따라 성능을 극대화하기 위한 매개변수를 포함하고 있으며 이들의 조합에 따라 체결 성능 및 신뢰성이 달라진다.
- 3) 체결 성능의 극대화를 위해 체결 알고리즘에 포함된 매개변수에 대한 사례연구를 수행하였고, 다양한 매개변수의 조합에 따라 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 보였다.

이 논문은 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. KRIT-CT-21-013, 차세대 회전익기 동력전달장치용 핵심부품)

## 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

“저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.”

## References

- 1) J. Y. Oh, U. K. Yun, Y. J. Park, G. H. Lee and C. S. Song, “Characteristics analysis of automatic transmission for the wheel-loader with shift control algorithm,” Korean Society of Manufacturing Tehcnology Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 639-645, 2011.
- 2) P. D. Walker, N. Zhang and R. Tamba, “Control of gear shifts in dual clutch transmission powertrains,” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, pp. 1923-1936, 2011.
- 3) G. H. Jung, “Development of clutch auto calibration algorithm for automatic transmission shift quality improvement,” J. of Drive and Control, Vol. 17, No.

- 3, pp. 47-56, 2020.
- 4) F. Meng, H. Chen, T. Zhang and X. Zhu, "Clutch fill control of an automatic transmission for heavy duty vehicle applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 64-65, pp. 16-28, 2015.
  - 5) K. D. Mishra and K. Srinivasan, "Robust control and estimation of clutch to clutch shifts," *Control Engineering Practice*, Vol. 65, pp. 100-114, 2017.
  - 6) S. P. Wurth, "F-35 propulsion system integration, development, and verification," *Aviation Technology, Intergration, and Operations Conference*, pp. 25-29, June, 2018.
  - 7) S. H. Cheon, J. K. Park, K. J. Jang, S. B. Shim, M. H. Jang and J. W. Lee, "Verification of Control Algorithm for Removing Oil Contaminant Factor from Proportional Pressure Control Valve," *J. of Drive and Control*, Vol. 17, No. 18, pp. 1-8, 2021.
  - 8) G. H. Jung, "Design of Creep Function for Forklift Automatic Transmission," *J. of Drive and Control*, Vol. 18, No. 2, pp. 46-55, 2021
  - 9) G. H. Jung, "An Upshift Improvement in the Quality of Forklift's Automatic Transmission by Learning Control," *J. of Drive and Control*, Vol. 19, No. 2, pp. 17-26, 2022
  - 10) S. P. Moon, S. G. Moon, J. S. Kim, J. H. Sohn, Y. J. Kim and S. C. Kim, "Transmission Efficiency of Dual-clutch Transmission in Agricultural Tractors," *J. of Drive and Control*, Vol. 19, No. 1, pp. 43-50, 2022
  - 11) J. H. Won, J. T. Jeon, Y. K. Hong, C. J. Yang, K. C. Kim, K. D. Kwon and G. H. Kim, "Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery," *J. of Drive and Control*, Vol. 19, No. 4, pp. 19-28, 2022
  - 12) J. G. Kang, K. R. Yoo and K. T. Park, "Structural Safety and Critical Speed Analysis of 2-Speed Shift Reducer," *J. of Drive and Control*, Vol. 19, No. 4, pp. 1-9, 2022
  - 13) D. K. Noh, D. W. Lee, T. J. Kim and J. S. Jang, "Case of Improving Design by Using Analysis Model of Hydraulic System for Dental Chair," *J. of Drive and Control*, Vol. 20, No. 2, pp. 1-6, 2023
  - 14) G. H. Jung, "Development of Embedded Transmission Simulator for the Verification of Forklift Shift Control Algorithm," *J. of Drive and Control*, Vol. 20, No. 4, pp. 17-26, 2023